

## 右心室機能測定法に関する核医学的研究

### -Single photon emission computed tomography 法を中心として-

金沢大学医学部核医学講座 (主任：久田欣一教授)

滝 淳 一

(昭和61年1月31日受付)

心電図同期 single photon emission computed tomography (以下 SPECT と略) による右室容積および右室駆出分画測定のための方法を開発し、基礎的ならびに臨床的検討を行った。また SPECT 法と平衡時心電図同期心プールシンチグラフィおよびファーストパス法を比較検討し、その臨床的有用性について検討を加えた。SPECT による容積計算は%カット値による心室輪郭決定後、その内部のボクセル数より換算して求めた。右室ファントムによる検討では、バックグラウンド(BG)が一定の場合にはファントム容積の変化に対して最適カット値(C)は有意の変化を示さなかった。これに対して最適カット値はバックグラウンドの変化と共に有意に変化し、再構成画像上でのファントム内最高カウントに対する%バックグラウンド値 BG と C の間には  $C=0.47 \cdot BG + 44.2$  (%),  $r=0.989$  の良好な相関関係が成立した。この相関式にもとづいてバックグラウンドよりカット値を決定しファントム容積の算出を行ったところ、真の容積の  $96 \pm 9.8\%$  (平均値±標準偏差)を示し良好な結果を得た。26例の臨床例に SPECT による本法を用いて左右心室容積を算出し、左室造影(left ventriculography, 以下 LVG と略)より求めた左室容積(Vol(LVG))と比較したところ SPECT による左室容積(Vol(SPECT))は、 $\text{Vol(SPECT)}=0.96 \cdot \text{Vol(LVG)}+6.6(\text{ml})$ ,  $r=0.983$ ,  $n=51$  となり左室造影の値とよく一致した。また SPECT 法にて左右心室の拍出量の比を求めたところ、逆流、短絡のない群では  $1.03 \pm 0.09$  とほぼ理論値を示し、右室容積も精度よく算出されていることが示された。平衡時心電図同期心プールシンチグラフィで拡張、収縮末期像にそれぞれ関心領域を設定し求めた右室駆出分画は  $46.8 \pm 9.0\%$  と SPECT 法の  $53.0 \pm 9.4\%$  に比較して有意の過少評価を認めた ( $p<0.005$ )。これに対してファーストパス法で拡張、収縮末期像にそれぞれ関心領域を設定して求めた右室駆出分画は  $58.1 \pm 7.5\%$  となり SPECT 法の  $55.3 \pm 8.5\%$  と有意差を認めず相関係数も  $0.837$  と良好な値を示した。以上より右室容積測定および右室駆出分画測定には SPECT 法は精度の良い方法と結論された。従来からの平衡時心電図同期法は右室駆出分画の過少評価を認めた。一方ファーストパス法は絶対容積の算出は不可能であるものの右室駆出分画の測定には簡便で信頼できる方法と考えられた。

---

**Key words** right ventricular ejection fraction, right ventricular volume, single photon emission computed tomography, stroke volume ratio

---

右心室機能評価の指標の一つである右室駆出分画(right ventricular ejection fraction, 以下 RVEF と略)と容積測定に関しては右室造影<sup>1)~4)</sup>および心臓超音波断層法<sup>5)~7)</sup>による報告が幾つかみられるが、右心室の解剖学的複雑性のために左室造影ほどの高精度は

得られておらず、また超音波法ではつねに解析にたえうる像を得ることは困難である<sup>8)~7)</sup>。一方、赤血球体内標識法<sup>9)</sup>による心プールシンチグラフィはカウント数と容積が比例することを利用しているために解剖学的な影響は右室造影に比較して少なく、またほぼすべて

---

Abbreviations: BG, background; LVEF, left ventricular ejection fraction; LVG, left ventriculography; ROI, region of interest; RVEF, right ventricular ejection fraction; SPECT, single photon emission computed tomography; SVR, stroke volume ratio; VOI, volume of interest.

の患者で比較的一定したデータがえられる非侵襲的な簡便な方法である。これは核医学的方法の長所であるが、また一方では幾つかの問題点を残しているのが現状である。現在比較的広く行なわれている RVEF 測定法は心電図同期平衡時心プールシンチグラフィおよびファーストパス法であるが前者では右室と右房の重なりが本質的に避けられず<sup>9)~12)</sup>、また後者ではカウント数が少ないため統計誤差が大きくなるなどの問題点を有している<sup>11)13)</sup>。最近登場した single photon emission computed tomography (以下 SPECT と略) を用いれば右心房と右心室の分離が可能となり容積および RVEF 算出の精度の向上が期待できる。本研究の目的はこの SPECT を用いた右室容積および RVEF 測定の新しい方法を開発すると共にその精度を検討し、従来より行なわれてきた心電図同期平衡時心プールシンチグラフィおよびファーストパス法と比較検討し、その臨床的有用性を評価することにある。

#### 対象および方法

##### 1. SPECT による心室容積および駆出分画の算出

###### 1. 基礎的検討

###### 1) 右心室ファントム

プラスチック製の三日月形断面を持つ錐体形の右心室ファントム(容積 31.5, 41, 70, 105, 134, 216, 305, 360 ml) を 8 種類作成した(図 1.A)。これら右心室ファントム内に  $5\mu\text{Ci/ml}$  の Tc-99m パーテクネチート溶液を満たし、種々のバックグラウンドをもつ Tc-99m パーテクネチート溶液を入れた胴体ファントム内に実際の人体内位置関係と同様になるように図 1.B のごとくに固定した。

###### 2) SPECT の撮像

低エネルギー高分解能コリメータを装着したカメラ

対向型 ECT 装置(島津, ZLC 7500)と核医学画像データ処理装置(島津, シンチパック 2400s)を使用し、2 個のコリメータ間の距離は 46 cm とした。投影データはウインドレベル、ウインド幅をそれぞれ 140 KeV, 20% として 10 度毎に 20 秒間ずつ 360 度にわたって  $64 \times 64$  マトリクスで収集した。得られた各投影像を 9 点加重スムージングした後に Shepp and Logan のフィルターを用いた filtered back projection 法により再構成した。減弱補正は行なわなかった。

###### 3) 右心室、左心室容積の算出

容積算出は得られた短軸断層像のファントム内最高カウントに対する % カット値を種々に変化させて辺縁を決定しその Volume of interest (以下 VOI と略) 内の総ボクセル数に 1 ボクセルの体積 (0.244 ml) を乗じて求めた。バックグラウンドはファントム内最高カウントを示すスライスにおいてファントム周囲に関心領域 (Reging of Interest, 以下 ROI と略) を設定し、ファントム内最高カウントに対する % 値で表した。右心室ファントムの容積及びバックグラウンドを種々に変化させて、その最適カット値に及ぼす影響を検討した。

###### 2. 臨床的検討

###### 1) 対象

虚血性心疾患 18 例, 大動脈弁閉鎖不全症 10 例, 僧房弁閉鎖不全症 7 例, 大動脈弁閉鎖不全兼僧房弁閉鎖不全症 4 例, 糖尿病 1 例, 僧房弁逸脱症候群 1 例, 非定型狭心痛症例 1 例を対象とした。

###### 2) SPECT の撮像

Tc-99m パーテクネチート 30 mCi による体内赤血球標識法<sup>8)</sup>を用い心電図同期 SPECT を施行した。1 心周期を 12 分割とし 10 度ごとに 60 秒間ずつ 360 度にわたりデータ収集した。断層像の再構成はファントム実験と同様にして作成した。

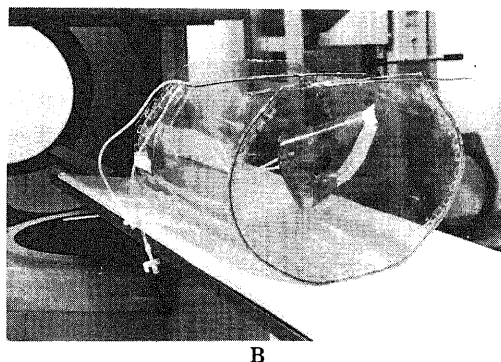
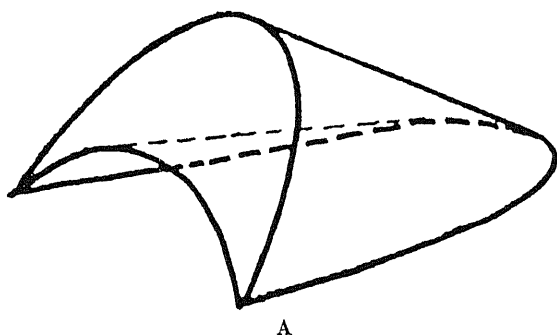


Fig. 1. Right ventricular and body phantom.

Right ventricular phantom (Fig. 1.A) was set in the body phantom (Fig. 1.B) in the same manner of actual heart position.

### 3) 心室容積ならびに駆出分画の算出

再構成にて得られた体軸横断層像から左右心室の境界ならびに房室間の境界決定の最も容易な4 chamber-view image を作成してシネ表示を行い拡張末期および収縮末期フレームを選んだ。拡張末期、収縮末期フレームの各スライスにそれぞれ左右心室のROIを設定した。この際心房と心室の境界の決定には位相イメージおよび拍出量イメージを参考として用いた。バックグラウンドROIは左右心室の最高カウントを有するスライスの前後5スライスにわたり収縮末期に左右心室の外側に弧状に設定した。心室辺縁決定のための最適カット値はファントム実験で得られた方法に従った。容積計算はファントム実験と同様にVOI内の総ボクセル数に1ボクセルの体積(0.244 ml)を乗じて求めた。駆出分画は心室の拡張末期容積から収縮末期容積を差し引いたものを拡張末期容積で除して求めた。また拍出量比(stroke volume ratio, 以下SVRと略)を左室と右室の1回拍出量の比すなわち左室一回拍出量を右室一回拍出量で割って求めた。

### 4) 心臓カテーテル検査による左心室容積の算出

Judkins法<sup>14)</sup>により施行された左室造影から左心室容積を算出した。左心室容積の測定は右前斜位一方向の心室性期外収縮とこれにひき続く次の一心拍を除外した左室拡張末期および収縮末期像よりArea-length法<sup>15)</sup>にて求めた。

## II. 平衡時心電図同期心プールシンチグラフィによる右室駆出分画の算出

### 1. 対象

SPECT スタディと同じ患者を対象とした。

### 2. データ収集法

Tc-99m パーテクネチド 30 mCi による体内赤血球標識施行15分後よりデータ収集を開始した。装置はスラントホールコリメータを装着したガンマカメラ(Ohio-Nuclear Σ410s)および核医学画像データ処理装置(Ohio-Nuclear, VIP-450)を使用した。35度のcaudal tiltをかけて左前斜位35度より600秒間のデータを、64×64マトリクスにて1心拍24フレームで収集した。

### 3. 右室駆出分画算出法

#### 1) 半自動辺縁決定プログラム法

得られたデータに対して空間および時間スムージングをそれぞれ1回行った後に、左室外側に辺縁から2〜3ピクセル離れて3時から6時の方向に弧状にバックグラウンドROIを設定しバックグラウンドサブトラクションを行なった。次いで拍出量イメージを参考として拡張末期像に右室ROIを設定し、24フレームすべてにおいてこの右室ROI内最高カウントの35%

以上を右室として認識し、右室時間放射能曲線の最大値から最小値を引きこれを最大値で除してRVEFを求めた。

#### 2) 2 ROI 法

拡張末期および収縮末期像に空間スムージングを1回行った後にGorisの変法によるバックグラウンドサブトラクションを施行した。すなわち心臓の左右に縦方向にバックグラウンドROIを設定し左右方向のみのinterpolative background subtraction<sup>16)</sup>を行なった。ついで拡張末期、収縮末期像にそれぞれ手動で右室ROIを設定し、右室拡張末期カウントから収縮末期カウントをひいてこれを拡張末期カウントで除してRVEFとした。

#### 4) Stroke volume ratio の算出

半自動辺縁決定プログラム法施行時に得られた拡張末期像から収縮末期像を差引いて拍出量イメージを作成した。これに左右心室部のROIを設定し右室拍出カウントと左室拍出カウントの比を求めSVRとした。

## III. ファーストパス法による右室駆出分画の算出

### 1. 対象

SPECT法と同じ患者を対象とした。

### 2. データ収集法

スラントホールコリメータを用い右前斜位30度方向から、30 mCiのTc-99m パーテクネチドをボラス注入し、直後より50 msecごとにデータ収集した。装置は心電図同期心プールシンチグラフィと同じものを使用した。

### 3. 右心室駆出分画算出法

#### 1) 固定ROI法

右心室描出相の画像に右心室ROIを手動で設定しそのROI内の50 msecごとの時間放射能曲線を作成した。この曲線の右心室の1〜3心拍の拡張末期および収縮末期カウントを求めた。RVEFは各心拍の拡張末期カウントから収縮末期カウントをひいてこれを拡張末期カウントで割った値を平均して求めた。

#### 2) 2 ROI 法

ファーストパス固定ROI法で求めた右室時間放射能曲線より右室拡張末期、収縮末期フレームを求め、それぞれの画像上に手動で右室ROIを設定し、拡張末期および収縮末期カウントを求めて固定ROI法と同様にしてRVEFを算出した。

## IV. 統計学的検討

測定値はいずれも平均値±標準偏差で示した。統計学的処理はStudent t検定および回帰分析により行なった。

## 成 績

### I. SPECTによる心室容積および駆出分画の算出

## 1. ファントム実験

### 1) 容積算出のための最適カット値の検討

#### i. カット値と計算容積の関係

図2にバックグラウンドの無い場合において41, 134, 360 ml のファントムにおいて%カット値とファントムの真の容積に対する計算容積の誤差を示した。計算容積はカット値により変化し、カット値が低くなると過大評価されカット値が高くなると過少評価されることが判明した。

#### ii. 容積変化と最適カット値との関係

図3にバックグラウンドが0の場合と胴体ファントム内 Tc-99m パーテクネイト溶液濃度がファントム内の20%の時の各ファントム容積と最適カット値の関係を示した。最適カット値はファントム容積の変化に対して大きな変化を示さずほぼ一定とみなすことができた。

#### iii. バックグラウンド値と最適カット値の関係

最適カット値はバックグラウンド値により変化を示した。図4に示すごとく両者の間には相関係数  $r=0.989$  ( $p<0.005$ ) の良好な正の相関関係が成立し、その直線回帰式は

$$C=0.47 \cdot BG+44.2 (\%) \cdots \cdots (1)$$

(C, 最適カット値 (%); BG, バックグラウンド値 (%)) となった。

### 2) ファントム実験で得られたカット値決定式を用

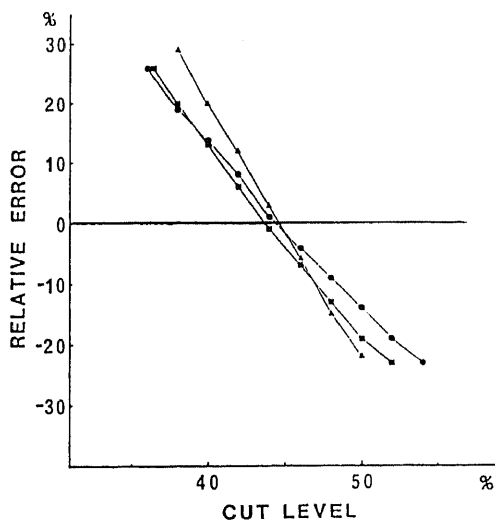


Fig. 2. Relationship between the cut levels and the relative error of calculated volumes by single photon emission computed tomography. The calculated volume changed according to cut level.  $\Delta$ , phantom of 41 ml;  $\blacksquare$ , phantom of 134 ml;  $\bullet$ , phantom of 360 ml.

### いたファントム容積の算出

容積 41 ml, 105 ml のファントムにおいてバックグラウンドを種々に変化させ、式(1)に基づいてカット値を決定して容積を算出した結果を図5に示した。計算容積は真の容積の  $100 \pm 8.1\%$  となった。また 31.5~360 ml のファントムにおいてバックグラウンドを 30% 台および 40% 台にしたときの計算容積を表1に示した。バックグラウンドが 30% 台, 40% 台でそれぞれ真の容積の  $94 \pm 9.7\%$ ,  $98 \pm 10.1\%$  でありバックグラウンドの変化に対して両者に有意差を認めず、全体では  $96 \pm 9.8\%$  であった。

## 2. 臨床的検討結果

### 1) 左室造影と SPECT による測定容積の対比検討

図6に左室造影から求めた左心室容積と SPECT から求めた左心室容積の相関を示した。拡張末期容積については両者の間に

$$\text{Vol}(\text{SPECT}) = 0.91 \cdot \text{Vol}(\text{LVG}) + 16.1 (\text{ml}), \quad r = 0.965 \quad (p < 0.005)$$

(Vol(SPECT), SPECT による左心室容積 (ml); Vol(LVG), 左室造影 (left ventriculography, 以下 LVG と略) による左心室容積 (ml); r, 相関係数) の良好な相関を認めた。SPECT 及び LVG による平均測定容積は  $146.0 \pm 54.8$ ,  $148.9 \pm 51.6$  ml であり有意差は認めなかった。同様にして収縮末期容積についても  $\text{Vol}(\text{SPECT}) = 0.96 \cdot \text{Vol}(\text{LVG}) + 4.9 (\text{ml}), \quad r = 0.973$  ( $p < 0.005$ ) の良好な相関を認めた。平均容積は SPECT, LVG でそれぞれ  $56.9 \pm 40.8$ ,  $59.5 \pm 40.3$  ml で有意差を認めなかった。拡張および収縮末期をあわせて全体としては  $\text{Vol}(\text{SPECT}) = 0.96 \cdot \text{Vol}(\text{LVG}) +$

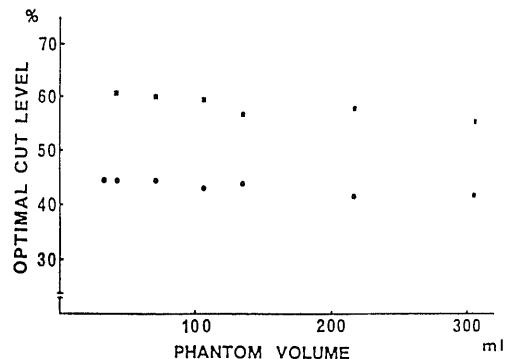


Fig. 3. Relationship between phantom volumes and optimal cut levels.

There was no significant change of optimal cut level among various phantom volumes.  $\bullet$ , no background;  $\blacksquare$ , the background concentration of Tc-99m was 20% of the concentration of Tc-99m in right ventricular phantom.

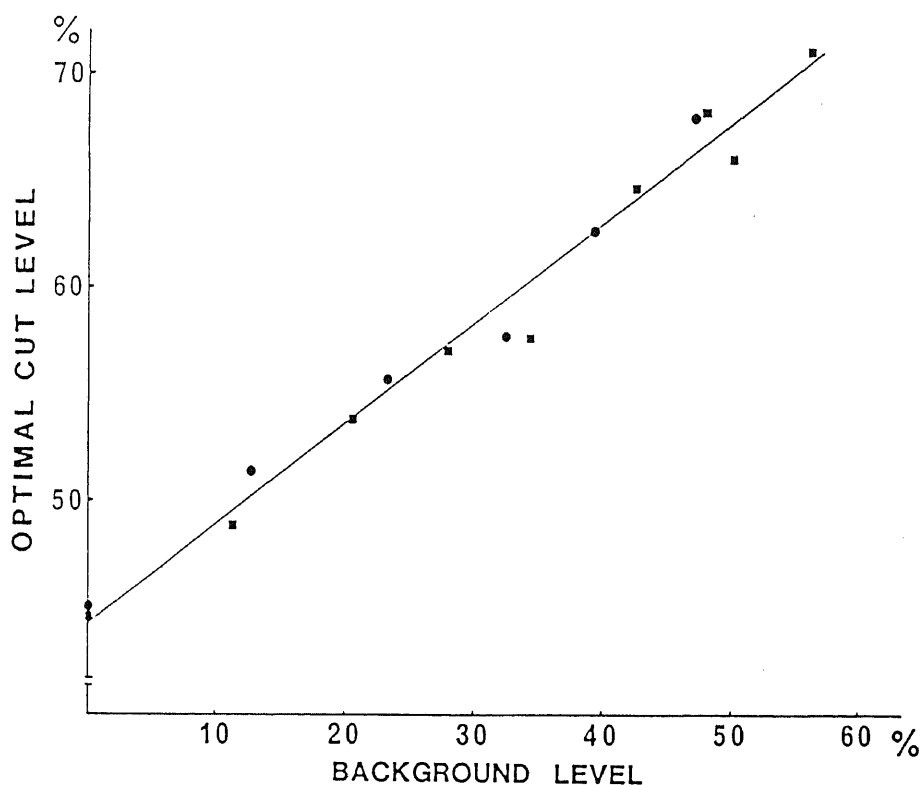


Fig. 4. Relationship between optimal cut level and background level.

There was a good correlation between optimal cut levels and background levels. The regression equation between the optimal cut levels(Y) and background levels(X) is  $Y = 0.47X + 44.2(\%)$  and the coefficient of correlation is  $r = 0.989$  ( $p < 0.005$ ,  $n = 15$ ). ●, phantom of 41 ml; ■, phantom of 105 ml.

6.6(ml),  $r = 0.983$  ( $p < 0.005$ ) と良好な相関を得た。SPECT および LVG による容積は  $102.3 \pm 65.8$ ,  $105.1 \pm 64.4$  ml であり有意差は認めなかった。

## 2) 拍出量比 (SVR) の検討

### i. SPECT 法による値

図 7 に逆流群および非逆流群の SVR 値を示した。逆流および短絡疾患のない 22 症例では SVR は  $1.03 \pm 0.09$  (SD) とほぼ理論値の 1 に近い値を示した。逆流を有する 21 症例では  $1.82 \pm 0.63$  となり、非逆流群に比して有意に高値を示した ( $p < 0.005$ )。Sellers 分類の 1~2 度 (1 度 1 例, 2 度 7 例) での SVR は  $1.55 \pm 0.31$ , 3 度の 6 例では  $1.89 \pm 0.30$  であり両者とも非逆流群に比して有意に高値を示した ( $p < 0.005$ )。1~2 度と 3 度の間には有意差を認めなかった ( $p = 0.1 \sim 0.05$ )。

### ii. SPECT 法と平衡時心電図同期法 (以下 Planar 法と略す) の SVR 値の比較

Planar 法による非逆流群の SVR は  $1.30 \pm 0.19$  で

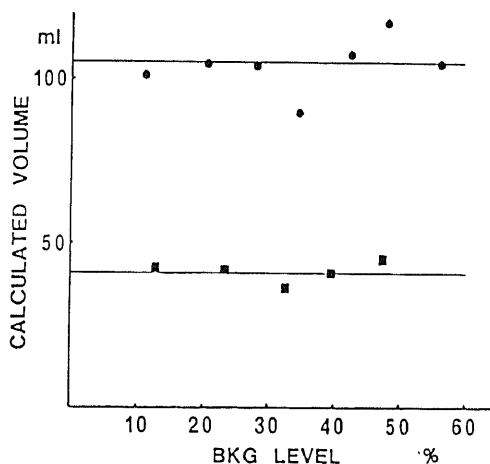


Fig. 5. The calculated volume by single photon emission computed tomography at various background levels. The calculated volume showed  $100 \pm 8.1$  (SD)% of actual phantom volume. ■, phantom of 41 ml; ●, phantom of 105 ml.

あり理論値より高値を示し、SPECT法と異なり過大評価を示した( $p < 0.005$ )。SPECT法およびPlanar法のそれぞれの非逆流群のSVR値の平均 $+2SD$ 以上を逆流ありとした場合の有病正診率、無病正診率、正診率を表2に示した。SPECT法およびPlanar法における有病正診率はそれぞれ95%および76%で無病正診率は100%および95%でありSPECT法のほうが高い診断率を示した。

## II. 平衡時心電図同期心プールシンチグラフィとSPECT法によるRVEF値の比較

### 1. 半自動辺縁決定プログラム法(以下MICA法と略す)を用いた場合の比較

MICA法とSPECT法によるRVEF(EF(MICA), EF(SPECT))の間には $EF(MICA) = 0.39 \cdot EF(SPECT) + 16.5(\%)$ ,  $r = 0.448$ ,  $n = 45$ と有意( $p < 0.005$ )の相関を認めたが相関係数は低値であった(図8)。MICA法ではRVEF値が $36.9 \pm 7.8\%$ とSPECT法の $52.3 \pm 9.0\%$ に比して有意に( $p < 0.005$ )低値を示した。

### 2. 2 ROI法を用いた場合の比較

2 ROI法とSPECT法によるRVEF(EF(2 ROI), EF(SPECT))の間には $EF(2 ROI) = 0.73 \cdot EF(SPECT) + 8.2(\%)$ ,  $r = 0.760$ ,  $n = 47$ の良好な相関( $p < 0.005$ )を認めた(図9)。2 ROI法のRVEFは $46.8 \pm 9.0\%$ を示しSPECT法の $53.0 \pm 9.4\%$ に比し

て低値を示した( $p < 0.005$ )。

### 3. MICA法と2 ROI法の比較

両者いずれもSPECT法に比較して有意に低値を示したがMICA法と2 ROI法の間にも有意差( $p < 0.005$ )を認めMICA法で低値を示した。相関係数は2 ROI法がMICA法より良好な値を示した。

## III. ファーストパス法とSPECT法によるRVEF値の比較

### 1. 固定ROI法を用いた場合の比較

固定ROI法とSPECT法によるRVEF(EF(FROI), EF(SPECT))の間には $EF(FROI) = 0.53 \cdot EF(SPECT) + 16.6(\%)$ ,  $r = 0.668$  ( $p < 0.005$ ),  $n = 44$ の相関を認めた(図10)。固定ROI法では $44.3 \pm 6.6\%$ とSPECT法の $53.7 \pm 9.2\%$ に比して有意に低値を示した( $p < 0.005$ )。

### 2. 2 ROI法を用いた場合の比較

2 ROI法とSPECT法によるRVEF(EF(2 ROI), EF(SPECT))の間には $EF(2 ROI) = 0.74 \cdot EF(SPECT) + 16.8(\%)$ ,  $r = 0.837$  ( $p < 0.005$ ),  $n = 38$ の良好な相関を認めた(図11)。2 ROI法とSPECT法の平均値はそれぞれ $58.1 \pm 7.5\%$ ,  $55.3 \pm 8.5\%$ であり有意差は認めなかった。

### 3. 固定ROI法と2 ROI法の比較

2 ROI法が固定ROI法に比してSPECT法と良好な相関を示し、また平均値も2 ROI法ではSPECT法

Table 1. Calculated volume of phantom using single photon emission computed tomography

Phantom volume (ml)	Back ground (%)	Calculated volume (ml)	Relative value of calculated volume (%)
31.5	36.8	35.8	113
	51.0	34.0	108
41.0	33.9	41.8	102
	70.0	66.0	94
105	48.9	80.0	114
	35.1	98.5	94
134	47.1	100	95
	32.1	114	85
216	45.9	117	87
	32.8	197	91
305	45.0	190	88
	32.4	253	83
360	44.5	290	95
	35.4	319	89
	46.4	366	102
96.0 $\pm$ 9.8(SD)			

と有意差を示さず、固定 ROI 法では 2 ROI 法より有意に過少評価された ( $p < 0.005$ )。

## 考 察

### I. SPECT による心室容積および駆出分画測定法について

従来からの Planar 画像では三次元情報を二次元に圧縮したものをみていた。これに対して SPECT は放射性医薬品の体内分布を体軸横断像、矢状断像、前額

断像をはじめとして任意の断層像を同等の画質として三次元的に得ることができる。この SPECT のもたらす三次元情報のために種々の臓器の輪郭を決定することにより臓器容積を算出することができるようになった。すでに肝臓をはじめとして脾臓、腎臓の SPECT による臓器容積測定に関する報告が幾つかみられる<sup>17)~20)</sup>。それらの基本的な考え方は等カウントレベルにて臓器輪郭を抽出しその輪郭内のボクセル数に単位ボクセル容積を乗じて容積を求めるというものであ

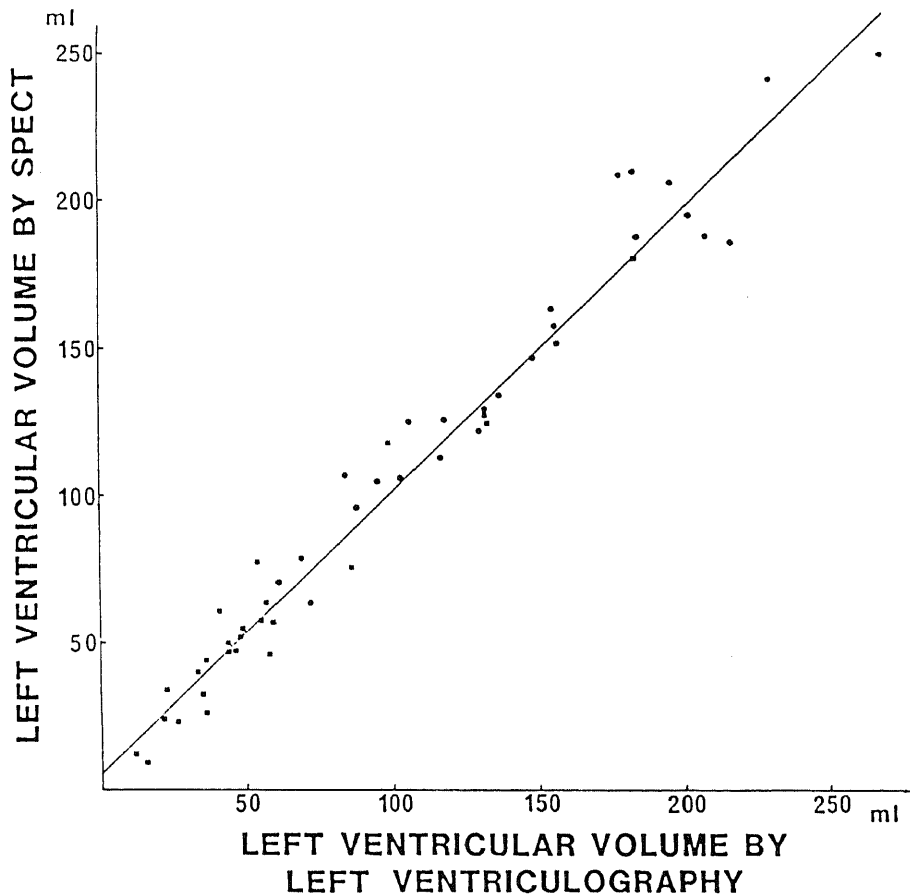


Fig. 6. Correlation between the left ventricular volumes determined by single photon emission computed tomography (SPECT) and those determined by left ventriculography (LVG). The regression equation between left ventricular end-diastolic volumes (●) determined by SPECT(Y) and those determined by LVG(X) is  $Y = 0.91X + 16.1$  (ml) and the coefficient of correlation is  $r = 0.965$  ( $p < 0.005$ ,  $n = 26$ ). The regression equation between left ventricular end-systolic volumes (■) determined by SPECT and those determined by LVG is  $Y = 0.96X + 4.9$  (ml) and the coefficient of correlation is  $r = 0.973$  ( $p < 0.005$ ,  $n = 25$ ). When left end-diastolic and end-systolic volumes are combined, the regression equation between left ventricular volumes determined by SPECT(Y) and those determined by LVG(X) is  $Y = 0.96X + 6.6$  (ml) and the coefficient of correlation is  $r = 0.983$  ( $p < 0.005$ ,  $n = 51$ ).

Table 2. The sensitivity, specificity and accuracy for detecting regurgitation

	Sensitivity	Specificity	Accuracy
Gated SPECT	95% (20/21)	100% (22/22)	98% (42/43)
Planar GBP	76% (16/21)	95% (21/22)	86% (37/43)

Abbreviations: SPECT, single photon emission computed tomography; GBP, gated blood pool method

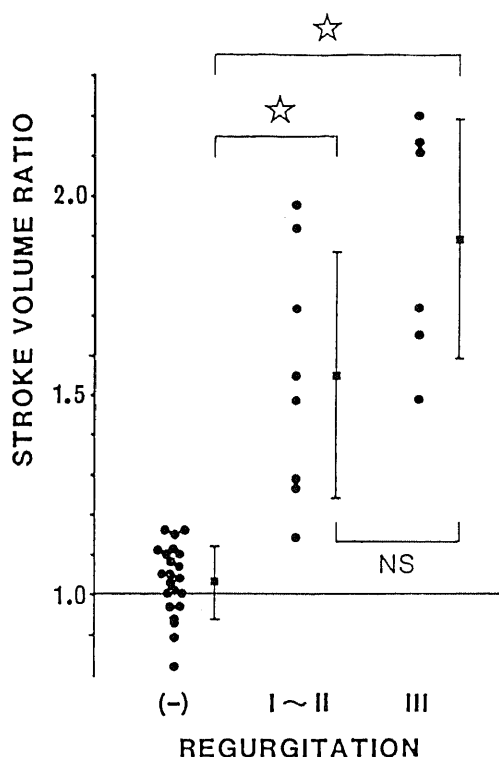


Fig. 7. Stroke volume ratios determined by SPECT in patients without regurgitation ((-)), in patients with aortic or mitral regurgitation of grade I ~ II of sellers' classification (I ~ II) and in patients with grade III regurgitation (III). Vertical bars represent mean  $\pm$  SD. ☆,  $p < 0.005$ ; NS, statistically not significant.

る<sup>17)18)</sup>。この場合適正なカット値を設定することにより正確な容積算出が可能となる。肝臓や腎臓などの目的臓器に特異的に集積する放射性医薬品を用いる場合にはバックグラウンドは非常に少なく無視することができるために一定のカット値で十分であると考えられる<sup>17)18)</sup>。これに対して赤血球を標識する心電図同期心プール SPECT では肺や胸郭などの血液プールに由来

するバックグラウンドはかなり高く、また病態により変化するために無視することはできない。ファントム実験で示されたように最適カット値はバックグラウンドにより変化するために一律に一定のカット値を適用することは不適切である。しかしながら再構成画像上のファントム内最高カウントに対するバックグラウンドの比と最適カット値は $r=0.989$ の良好な正の相関を示した。この相関式を用い最適カット値をバックグラウンドから推定しファントム容積を算出したところ真の値に近い結果を得ることができ、従ってバックグラウンド変化による測定誤差を解決することができた。臨床例 26 症例 51 測定値について SPECT による本法を用いて左室容積を算出し左室造影から求めた値と対比したところ非常に良好な一致をみることができ、本法の精度の高さが証明された。右室容積に関しては今だ確立された標準的な検査法がなく右室造影も容積測定に関しては左室造影に比較して繁雑<sup>1)~4)</sup>で信頼度にも問題があるとされている。従って右室容積については他の検査法との比較は行なわなかった。本法による右室容積評価の妥当性を検討するために左室と右室の一回拍出量の比である SVR を検討した。逆流および短絡疾患のない場合には容積測定が正しく行なわれていれば SVR は 1 となることが期待されるはずである。従来法である Planar 像による逆流、短絡のない群の SVR は  $1.30 \pm 0.19$  と理論値より大きく諸家の報告と同様の値を示した<sup>21)~25)</sup>。これに対して SPECT による本法での逆流、短絡のない群の SVR は  $1.03 \pm 0.09$  でありほぼ理論値を示した。以上より右室容積に関しても SPECT による本法は精度の高い測定法であると思われる。核医学手法による心室容積測定に関しては Planar 像による検討が従来より多数行なわれている<sup>26)~35)</sup>。その基本的な考え方は心室内カウントがその容積に比例することを利用している。すなわち採血により求めた単位容積当たりのカウント数で心室内カウント数を割ることにより心室容積を求めようとするものである。しかしながら心室内からの  $\gamma$  線の減弱補正が必要であり<sup>30)~35)</sup>、心室の体表面からの深さを求めるための正面像<sup>30)~32)</sup>または左後斜位像の追加<sup>33)</sup>やさら



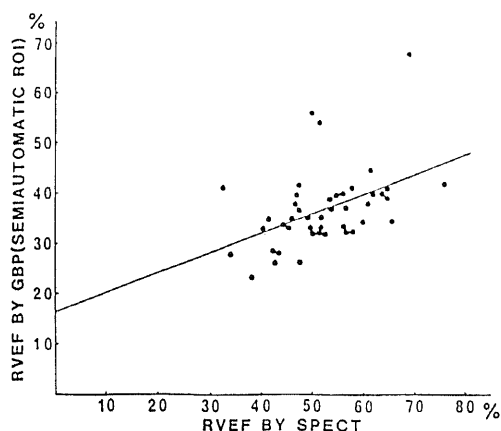


Fig. 8. Correlation between right ventricular ejection fractions (RVEFs) obtained by planar gated blood pool (GBP) technique using semi-automatic setting of right ventricular region of interest (ROI) and RVEFs by single photon emission computed tomography (SPECT). The regression equation between RVEFs obtained by GBP(Y) and SPECT(X) is  $Y=0.39X+16.5(\%)$  and the coefficient of correlation is  $r=0.448$  ( $p<0.005$ ,  $n=45$ ).

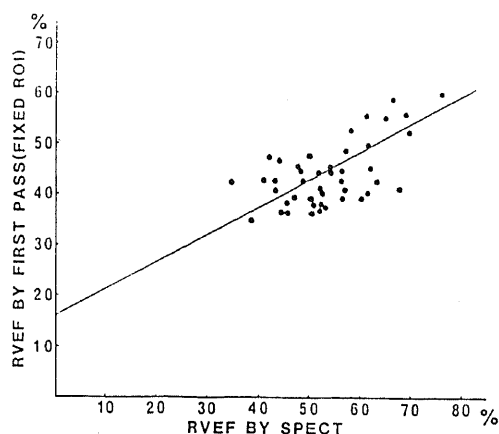


Fig. 10. Correlation between right ventricular ejection fractions (RVEFs) obtained by first pass technique using fixed right ventricular region of interest (ROI) and RVEFs by single photon emission computed tomography (SPECT). The regression equation between RVEFs obtained by first pass technique(Y) and by SPECT(X) is  $Y=0.53X+16.6(\%)$  and the coefficient of correlation is  $r=0.668$  ( $p<0.005$ ,  $n=44$ ).

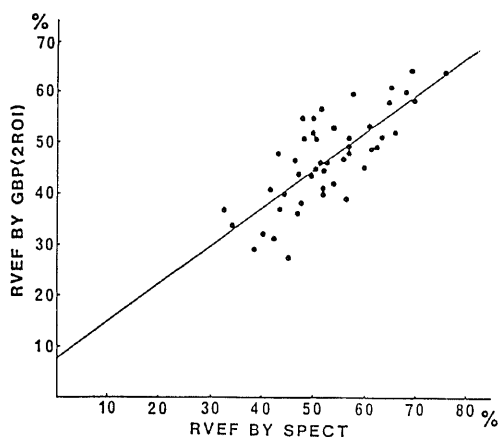


Fig. 9. Correlation between right ventricular ejection fractions (RVEFs) obtained by planar gated blood pool (GBP) technique using variable right ventricular region of interest (ROI) and RVEFs by single photon emission computed tomography (SPECT). The regression equation between RVEFs obtained by GBP(Y) and by SPECT(X) is  $Y=0.73X+8.2(\%)$  and the coefficient of correlations is  $r=0.760$  ( $p<0.005$ ,  $n=47$ ).

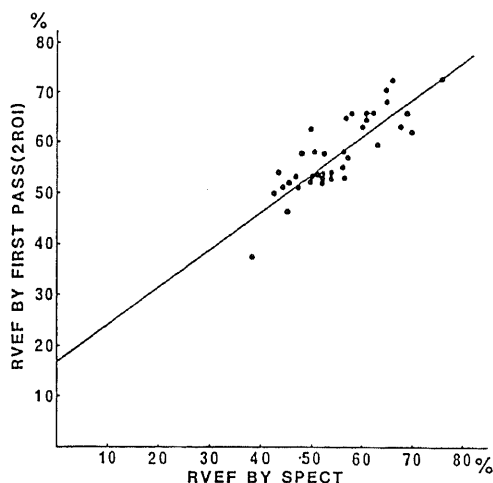


Fig. 11. Correlation between right ventricular ejection fractions (RVEFs) obtained by first pass technique using variable right ventricular region of interest (ROI) and RVEFs by single photon emission computed tomography (SPECT). The regression equation between RVEFs obtained by first pass technique(Y) and by SPECT(X) is  $Y=0.74X+16.8(\%)$  and the coefficient of correlation is  $r=0.837$  ( $p<0.005$ ,  $n=38$ ).

には buildup factor を用いた複雑な補正<sup>35)</sup>も必要となる。また撮像方向の前後に目的以外の臓器が重なる場合、すなわち心室に心房が重なる場合にはその影響の除外は本質的に不可能である。とくに右心室容積および RVEF を測定する場合は右心房の右心室への重なりは常に問題となる<sup>9)12)</sup>。これに対して SPECT 法は心室輪郭を求めるわけであり  $\gamma$  線の吸収補正も採血も必要なく臓器の重なりも完全に除くことが可能である<sup>36)</sup>。従って SPECT 法による心室容積および駆出分画測定は左心室はもとより右心室では特に有用な方法であり、ファントム実験ならびに臨床検討の結果信頼性のある方法と結論できた。

## II. 平衡時心電図同期法と SPECT 法の比較

MICA 法は左室駆出分画測定 (left ventricular ejection fraction, LVEF) にはよく用いられている方法であるが、右心室に用いた場合には SPECT 法に比して RVEF の過少評価ははなはだしく、これは収縮期に右心房が ROI 内に一部入るためによる結果と考えられた。2 ROI 法では収縮期に別に ROI を設定するためにイメージの上では MICA 法より右房を除外することができる。しかしながら過少評価はかなり改善されるものの完全なものではなかった。この房室間の重なりは本質的には SPECT を用いないと解決できないものと考えられる<sup>39)</sup>。2 ROI 法の利点としてはデータ収集しながら運動負荷をかけることができるので運動による RVEF の変化をみるには有効な方法であると考えられる。

## III. ファーストパス法と SPECT 法の比較

ファーストパス法の利点としては右前斜位からデータ収集するために平衡時法で問題となった右室と右房の重なりがほとんどなくなることにある<sup>28)37)</sup>。また検査時間が短くわずか 1 分でデータ収集が終わることである。問題点としてはカウント数が少ないための統計誤差が他の方法に比して大きいこと<sup>11)13)</sup>、放射性医薬品の右室通過時のポーラス性に注意を要することである。すなわち LVEF の測定ではポーラスはよければよいほどよいが RVEF 測定の場合はよすぎるとアイソトープの右室通過が早すぎるために 1 心拍のデータも十分に取れないことがあり、またポーラスが不良であると肺の放射能が右室に重なってくるということが起こるのでアイソトープ注入に注意を要する。RVEF の SPECT 法との比較では固定 ROI 法は比較的良好な相関を示すものの有意に低値を示した。これは収縮期に右房が ROI 内に入るからであり、簡便な方法であり広く用いられているが正確さを期すためには好ましい方法とは言えない。2 ROI 法は SPECT 法との相関も良く測定値にも有意差を認めず平衡時法を含め最も良

い方法であると考えられた。

## IV. 日常臨床検査に於いていかなる方法を用いるのが好ましいかについて

### 1. 安静時

RVEF および右室容積ともに求めたいときには同時に LVEF、左室容積も正確に測定できる SPECT 法が最良と思われる。しかし患者の状態が悪く短時間で検査を終わらなければならないときや容積が不必要な時にはファーストパス法の 2 ROI 法にて RVEF と LVEF を測定するのがよいと思われる。RVEF の正確な値は必要とせずに右室壁運動の異常をスクリーニングとしてみるには平衡時法で十分であり、参考として 2 ROI 法で RVEF を算出しておくのがよいと思われる。

### 2. 薬剤負荷および運動負荷時

SPECT 法はデータ収集に約 20 分を要するので運動負荷には適応がなくまた薬剤負荷にも一般的ではないと考えられる。ファーストパス法はデータ収集の時間は約 1 分で問題はないが Tc-99m パーテクネイトを用いる場合は 1 回目の測定時のバックグラウンドの影響が大きく運動時の 2 回目の値が不正確になるので好ましくない。Xe-133 や Kr-81m を使用すれば前回測定時のバックグラウンドの問題は解決されるがかなりのコスト高となり<sup>37)</sup>好ましくない。平衡時法は約 90~120 秒間隔でデータ収集できるので RVEF、LVEF とともに負荷による反応を安静時と最大負荷時のみでなく経時的に見ることができ最も良い方法であると考えられる。

## 結 論

SPECT による左右心室容積算出法を開発し従来からの平衡時法およびファーストパス法と比較検討した結果以下の結論を得た。

1. SPECT において容積算出のための最適カット値 (C) は各ファントム容積により変化を示さずファントム内最高カウントに対するバックグラウンドの比 (BG) により変化し、 $C=0.47 \cdot BG+44.2$  (%),  $r=0.989$  の関係を認めた。

2. 上記式にしたがって最適カット値を決定し求めた左室容積 (Vol(SPECT)) と X 線左室造影から求めた左室容積 (Vol(LVG)) は  $\text{Vol(SPECT)}=0.96 \cdot \text{Vol(LVG)}+6.6(\text{ml})$ ,  $r=0.983$  と良く一致した。

3. 逆流、短絡のない患者での SPECT による左右心室 1 回拍出量の比は  $1.03 \pm 0.09$  とほぼ理論値を示した。この結果と 2. で示した左室容積算出の高い精度より右室容積算出も正確であると考えられた。

4. 平衡時法より求めた RVEF は半自動辺縁決定

プログラムを用いた場合は SPECT 法の  $52.3 \pm 9.0\%$  に対し  $36.9 \pm 7.8\%$  と過少評価がいちじるしく相関も悪く ( $r=0.448$ ) 不適切な方法と考えられた。一方 2 ROI 法は SPECT 法の  $53.0 \pm 9.4\%$  に対して  $46.8 \pm 9.0\%$  と過少評価は認めるものの相関も比較的良く ( $r=0.760$ ) 運動や薬剤負荷による RVEF の変化をみるのに有用と思われた。

5. ファーストパス法では右室容積は得られないものの、RVEF については比較的良い結果が得られた。固定 ROI 法では SPECT 法に比較して有意に過少評価を認めたが、2 ROI 法では過少評価は認めず相関も良好で ( $r=0.837$ ) あり、簡便で信頼できる方法と考えられた。

6. 以上より SPECT は左室容積および LVEF 測定のみならず、右室容積および RVEF 算出においても精度の高いすぐれた方法であり、また平衡時法の 2 ROI 法は運動や薬剤負荷検査に、ファーストパス法は重症患者やルーチンの検査法として有用と考えられた。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、御指導、御校閲を賜った恩師久田欣一教授に深甚なる謝意を捧げます。また本研究の遂行にあたり、終始ご助言を賜りました分校久志講師に深く感謝致します。さらにご協力いただいた第一内科、第二内科、第一外科の各位並びに核医学教室員、アイソトープ部の各位に感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) Arcilla, R. A., Tsai, P., Thilenius, O. & Ranniger, K.: Angiographic method for volume estimation of right and left ventricles. *Chest*, **60**, 446-454 (1971).
- 2) Gentzler, R. D. II, Brisell, M. F. & Gault, J. H.: Angiographic estimation of right ventricular volume in man. *Circulation*, **50**, 324-330 (1974).
- 3) Fisher, E. A., DuBrow, I. W. & Hastreiter, A. R.: Right ventricular volume in congenital heart disease. *Am. J. Cardiol.*, **36**, 67-75 (1975).
- 4) Ferlinz, J., Gorlin, R., Cohn, P. F. & Herman, M. V.: Right ventricular performance in patients with coronary artery disease. *Circulation*, **52**, 608-615 (1975).
- 5) Bommer, W., Weinert, L., Neumann, A., Neef, J., Mason, D. T. & DeMaria, A.: Determination of right atrial and right ventricular size by two-dimensional echocardiography. *Circulation*, **60**, 91-100 (1979).
- 6) Watanabe, T., Katsume, H., Matsukobo, H., Furukawa, K. & Ijichi, H.: Estimation of right ventricular volume with two-dimensional echocardiography. *Am. J. Cardiol.*, **49**, 1946-1953 (1982).
- 7) Starling, M. R., Crawford, M. H., Sorenson, S. G. & O'Rourke, R. A.: A new two-dimensional echocardiographic technique for evaluating right ventricular size and performance in patients with obstructive lung disease. *Circulation*, **66**, 612-620 (1982).
- 8) Pavel, D. G., Zimmer, A. M., Patterson, V. N.: In vivo labelling of red blood cells with  $^{99m}\text{Tc}$ : A new approach to blood pool visualization. *J. Nucl. Med.*, **18**, 305-308 (1977).
- 9) Maddahi, J., Berman, D. S., Matsuoka, D. T., Waxman, A. D., Stankus, K. E., Forrester, J. S. & Swan, H. J. C.: A new technique for assessing right ventricular ejection fraction using rapid multiple-gated equilibrium cardiac blood pool scintigraphy: Description, validation and findings in chronic coronary artery disease. *Circulation*, **60**, 581-589 (1979).
- 10) Slutsky, R., Hooper, W., Gerber, K., Battler, A., Froelicher, V., Ashburn, W. & Karliner, J.: Assessment of right ventricular function at rest and during exercise in patients with coronary heart disease: A new approach using equilibrium radionuclide angiography. *Am. J. Cardiol.*, **45**, 63-71 (1980).
- 11) Holman, B. L., Wynne, J., Zielonka, J. S. & Idoine, J. D.: A simplified technique for measuring right ventricular ejection fraction using the equilibrium radionuclide angiogram and the slant-hole collimator. *Radiology*, **138**, 429-435 (1981).
- 12) Legrand, V., Chevigne, M., Foulon, J. & Rigo, P.: Evaluation of right-ventricular function by gated blood-pool scintigraphy. *J. Nucl. Med.*, **24**, 886-893 (1983).
- 13) Tobinick, E., Schelbert, H. R., Henning, H., LeWinter, M., Taylor, A., Ashburn, W. L., & Karliner, J. S.: Right ventricular ejection fraction in Patients with acute anterior and inferior myocardial infarction assessed by radionuclide angiography. *circulation*, **57**, 1078-1084 (1978).
- 14) Judkins, M. P.: Selective coronary arteriography. Part I: A percutaneous transfemoral technique. *Radiology*, **89**, 815-824 (1967).

- 15) Kennedy, J. W., Trenholme, S. E. & Kasser, I. S.: Left ventricular volume and mass from single-plane cineangiogram: A comparison of anteroposterior and right anterior oblique methods. *Am. Heart J.*, **80**, 343-352 (1970).
- 16) Goris, M. L., Daspit, S. G., McLaughlin, P. & Kriss, J. P.: Interpolative background subtraction. *J. Nucl. Med.*, **17**, 744-747 (1976).
- 17) Tauxe, W. N., Soussaline, F., Todd-Pokropek, A., Cao, A., Collard, P., Richard, S., Raynaud, C. & Itti, R.: Determination of organ volume by single-photon emission tomography. *J. Nucl. Med.*, **23**, 984-987 (1982).
- 18) Tauxe, W. N., Todd-Pokropek, A., Soussaline, F., Raynaud, C. & Kellershohn.: Estimates of kidney volume by single photon emission tomography: A preliminary report. *Eur. J. Nucl. Med.*, **8**, 72-74 (1983).
- 19) Kan, M. K. & Hopkins, B.: Measurement of liver volume by emission computed tomography. *J. Nucl. Med.*, **20**, 514-520 (1979).
- 20) Strauss, L. G., Clorius, J. H., Frank, T. & van Kaick, G.: Single photon emission computerized tomography (SPECT) for estimates of liver and spleen volume. *J. Nucl. Med.* **25**, 81-85 (1984).
- 21) Rigo, P., Alderson, P. O. Robertson, R. M., Becker, L. C. & Wagner, H. N.: Measurement of aortic and mitral regurgitation by gated cardiac blood pool scans. *Circulation*, **60**, 306-312 (1979).
- 22) Urquhart, J., Patterson, R. E., Packer, M., Goldsmith, S. J., Horowitz, S. F., Litwak, R. & Gorlin, R.: Quantification of valve regurgitation by radionuclide angiography before and after valve replacement surgery. *Am. J. Cardiol.*, **47**, 287-291 (1981).
- 23) Gandsman, E. J., North, D. L., Shulman, R. S. & Bough, E. W.: Measurement of the ventricular stroke volume ratio by gated radionuclide angiography. *Radiology*, **138**, 161-165 (1981).
- 24) Lam, W., Pavel, D., Byrom, E., Sheikh, A., Best, D. & Rosen, K.: Radionuclide regurgitant index: value and limitations. *Am. J. Cardiol.*, **47**, 292-298 (1981).
- 25) Makler, P. T. Jr., McCarthy, D. M., Velchik, M. G., Goldstein, H. A. & Alani, A.: Fourier amplitude ratio: A new way to assess valvular regurgitation. *J. Nucl. Med.*, **24**, 204-207 (1983).
- 26) Dehmer, G. J., Firth, B. G., Lewis, S. E., Willerson, J. T. & Hillis, L. D.: Direct measurement of cardiac output by gated equilibrium blood pool scintigraphy: Validation of scintigraphic volume measurements by a nongeometric technique. *Am. J. Cardiol.*, **47**, 1061-1067 (1981).
- 27) Dehmer, G. J., Lewis, S. E., Hillis, L. D., Twieg, D., Falkoff, M., Parkey, R. W. & Willerson, J. T.: Nongeometric determination of left ventricular volumes from equilibrium blood pool scans. *Am. J. Cardiol.*, **45**, 293-300 (1980).
- 28) Dehmer, G. J., Firth, B. G., Hillis, L. D., Nicod, P. Willerson, J. T. & Lewis, S. E.: Nongeometric determination of right ventricular volume from equilibrium blood pool scans. *Am. J. Cardiol.*, **49**, 78-84 (1982).
- 29) Slutsky, R., Karliner, J. & Ricci, D.: Left ventricular volume by gated equilibrium radionuclide angiography: A new method. *Circulation*, **60**, 556-564 (1979).
- 30) Links, J. M., Becker, L. C., Shindleddecker, J. G., Guzman, P., Burow, R. D., Nickoloff, E. L., Alderson, P. O. & Wagner, H. N.: Measurement of absolute left ventricular volume from gated blood pool studies. *Circulation*, **65**, 82-91 (1982).
- 31) Starling, M. R., Dell'Italia, L. J., Nusynowitz, M. L., Walsh, R. A., Little, W. C. & Benedetto, A. R.: Estimates of left-ventricular volumes by equilibrium radionuclide angiography: Importance of attenuation correction. *J. Nucl. Med.*, **25**, 14-20(1984).
- 32) Dell'Italia, L. J., Starling, M. R., Walsh, R. A., Badke, F. R., Lasher, J. C. & Blumhardt, R.: Validation of attenuation-corrected equilibrium radionuclide angiographic determinations of right ventricular volume: Comparison with cast-validated biplane cineventriculography. *Circulation*, **72**, 317-326 (1985).
- 33) Rabinovitch, M. A., Kalff, V., Koral, K., Chan, W., Juni, J. E., Lerman, B., Lampman, R., Walton, J., Grassley, D., Vogel, R., Pitt, B. & Thrall, J. H.: Count-based left ventricular volume determination utilizing a left posterior oblique view for attenuation correction. *Radiology*, **150**, 813-818 (1984).
- 34) Fearnow, E. C.III, Stanfield, J. A., Jaszczak, R. J., Harris, C. C. & Coleman, R. E.: Factors

affecting ventricular volumes determined by a count-based equilibrium method. *J. Nucl. Med.*, **26**, 1042-1047 (1985).

35) Siegel, J. A.: The effect of source size on the buildup factor calculation of absolute volume. *J. Nucl. Med.*, **26**, 1319-1322 (1985).

36) Bunker, S. R., Hartshorne, M. F., Schmidt, W. P., Cawthon, M. A., Karl, R. D. Jr., Bauman, J. M., Howard, W. H. III & Rubal, B. J.: Left

ventricular volume determination from single-photon emission computed tomography. *Am. J. Radiol.*, **144**, 295-298 (1985).

37) Goldberg, M. J., Mantel, J., Friedin, M., Ruskin, R. & Rubenfire, M.: Intravenous xenon-133 for the determination of radionuclide first pass right ventricular ejection fraction. *Am. J. Cardiol.*, **47**, 626-630 (1981).

**Evaluation of Right ventricular Function Using Radionuclide Technique: with Special Emphasis on Gated Single Photon Emission Computed Tomography** Junichi Taki, Department of Nuclear Medicine, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa 920 — *J. J. Nucl. Med. Soc.*, **95**, 99—112 (1986)

**Key words:** right ventricular ejection fraction, right ventricular volume, single photon emission computed tomography, stroke volume ratio

#### Abstract

A new method for the measurement of right ventricular volume and ejection fraction using gated single photon emission computed tomography (SPECT) was developed and evaluated in phantom and in patients. Right ventricular ejection fraction (RVEF) calculated by SPECT was compared with RVEFs by planar gated blood pool (GBP) and first pass (FP) techniques. In SPECT study, after reconstructing ventricular tomographic slices, ventricular perimeters were determined using a certain threshold level (% of maximum count in the chamber). The ventricular volumes were then calculated based on the number of voxels of interest. Since optimal threshold level for delineating perimeter was considered to be influenced by the background (BG) and the ventricular volume, the relations among these factors were studied. Although optimal threshold level was not affected significantly by the volume of the chamber when BG was constant, optimal threshold level (OT) had linear correlation with BG level; that was:  $OT = 0.47 \cdot BG + 44.2(\%)$ ,  $r = 0.989$ . When this equation was used for volume calculation, the relative estimated volume of various sizes of phantom in various BG levels was  $96 \pm 9.8\%$  (SD). In 26 patients, left ventricular end-diastolic and end-systolic volume calculated by SPECT (Vol (SPECT)) showed excellent correlation with the volume by single-plane left ventriculography (Vol (LVG)); that was  $Vol (SPECT) = 0.96 \cdot Vol (LVG) + 6.6(\text{ml})$ ,  $r = 0.983$ ,  $n = 51$ . In 22 patients without valvular and/or shunt diseases, stroke volume (SV) ratio (left ventricular SV/right ventricular SV) measured by SPECT was compared with that obtained by planar GBP. SV ratio obtained by SPECT was  $1.03 \pm 0.09(\text{SD})$ , while it was  $1.30 \pm 0.19$  by planar GBP. This indicated that the measurement of right ventricular volume by SPECT was reliable. RVEFs obtained by the GBP (variable ROI method) technique (EF(GBP)) showed good correlation with that obtained by SPECT (EF(SPECT)); that is:  $EF (GBP) = 0.73 \cdot EF(SPECT) + 8.2(\%)$ ,  $r = 0.760$ ,  $n = 47$ . However, RVEF obtained by GBP were significantly underestimated compared with that obtained by SPECT ( $46.8 \pm 9.0\%$  vs  $53.0 \pm 9.4\%$ ). This underestimation was thought to be due to the overlap of right atrium and right ventricle. RVEFs obtained by the FP (variable ROI method) technique

(EF(EP)) showed good correlation with that obtained by SPECT (EF(SPECT)); that is  $EF(FP) = 0.74 \cdot EF(SPECT) + 16.8(\%)$ ,  $r=0.837$ ,  $n=38$ . And there was no significant difference between FP and SPECT methods ( $58.1 \pm 7.5\%$  vs  $55.3 \pm 8.5\%$ ). In conclusion, this SPECT method was accurate and reliable for the determination of RVEF and absolute right ventricular volume as well as left ventricular volume. And the first pass technique was simple and reliable for the measurement of RVEF.